中国生态农业学报 2017 年 1 月 第 25 卷 第 1 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Jan. 2017, 25(1): 104−117

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.160596

马振勇, 杜虎林, 刘荣国, 严子柱, 刘立刚, 刘超, 牛金帅. 沙坡头区直插式根灌条件下土壤水分变化分析[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(1): 104−117

Ma Z Y, Du H L, Liu R G, Yan Z Z, Liu L G, Liu C, Niu J S. Variations in soil water in Shapotou Area under straight-tube root irrigation[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(1): 104−117

沙坡头区直插式根灌条件下土壤水分变化分析*

马振勇[1,2], 杜虎林[1], 刘荣国[3], 严子柱[4], 刘立刚[3], 刘　超[3], 牛金帅[3]

(1. 中国科学院西北生态环境资源研究院　兰州　730000; 2. 中国科学院大学　北京　100049; 3. 宁夏中卫沙坡头国家级自然保护区管理局　中卫　755000; 4. 甘肃省治沙研究所　兰州　730070)

摘　要: 为提高沙坡头地区造林过程中的水分利用效率, 制定最优化的灌溉制度, 在宁夏中卫沙坡头自然保护区, 两年生固沙梭梭(*Haloxy lonammodendron*)林展开直插式根灌节水试验, 分析和模拟直插式根灌过程中土壤水分入渗和消退规律。结果表明: 1)直插式根灌过程中, 土壤含水量随灌水时间的变化符合 Logistic 曲线变化; 停灌后, 土壤水分消退规律符合幂函数模型变化。2)本试验条件下, 不同土层土壤水分最大入渗速率依次为 60 cm>40 cm>80 cm>100 cm>20 cm, 达到最大入渗速率的时间 40 cm 土层最短, 平均为 1.22 h, 100 cm 土层最长, 平均为 4.57 h; 1 m 深土层土壤水分最大入渗速率平均为 1.65%·h^{-1}, 达到最大入渗速率的时间平均为 2.16 h。3)根据模拟结果, 建议沙坡头区梭梭林直插式根灌灌溉周期为 4 d 左右, 单次灌水时间以 6~10 h 为宜。4)停灌 2 h 后, 各土层土壤含水量消退速率随土层深度增加而增大, 停灌后 48 h, 各土层土壤水分消退速率基本为零; 梭梭全生长期, 1 m 深土层土壤水分消退速率在结实期最大, 为 2.20%·h^{-1}, 休眠期最小, 为 1.31%·h^{-1}。5)直插式根灌对 20 cm 土层土壤水分的影响最小, 对 60 cm 土层土壤水分影响最大; 灌溉过程中, 土壤水分等值线以 60 cm 土层等值线为中心, 向表层和深层土壤辐射状分布, 灌后各土层平均土壤含水量, 20 cm 和 60 cm 土层与其他各土层之间差异显著(P<0.05)。研究表明, 直插式根灌的土壤水分入渗规律符合 Logistic 曲线变化, 消退规律符合幂函数曲线变化, 直插式根灌对 20 cm 土层土壤水分的影响最小, 对 60 cm 土层土壤水分影响最大, 沙坡头区梭梭林直插式根灌灌溉周期为 4 d 左右, 单次灌水时间以 6~10 h 为宜。

关键词: 人工固沙梭梭林; 直插式根灌; 土壤水分; 入渗; 消退; 灌溉周期
中图分类号: S275.6　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1671-3990(2017)01-0104-14

Variation in soil water in Shapotou Area under straight-tube root irrigation*

MA Zhenyong[1,2], DU Hulin[1], LIU Rongguo[3], YAN Zizhu[4], LIU Ligang[3], LIU Chao[3], NIU Jinshuai[3]

(1. Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Ningxia Shapotou National Nature Reserve Administration, Zhongwei 755000, China; 4. Gansu Desert Control Research Institute, Lanzhou 730070, China)

Abstract: In order to improve water use efficiency of afforestation drive in Shapotou Area, straight-tube root irrigation test was carried out on biennial sand-fixation *Haloxy lonammodendron* in Shapotou Nature Reserve Area in Zhongwei, Ningxia. The

* 宁夏回族自治区环境保护厅"宁夏环保生态示范基地根灌节水技术研究与示范"项目(Y490L61001)和甘肃省科技支撑计划项目(1304JKCA170)资助

马振勇, 主要从事干旱区生态水文、节水灌溉及水肥耦合等方面的研究。E-mail: mzyzhx@163.com

收稿日期: 2016-07-05　接受日期: 2016-09-14

* The study was supported by the Research and Demonstration Project of the Environmental Protection Department of Ningxia Hui Autonomous Region "Root Irrigation Water-saving Technology in the Environmental and Ecological Demonstration Base in Ningxia" (Y490L61001) and the Science and Technology Support Project of Gansu Province (1304JKCA170).

Corresponding author, MA Zhenyong, E-mail: mzyzhx@163.com

Received Jul. 5, 2016; accepted Sep. 14, 2016

test aimed to study the variation rules of soil moisture in the 0–100 cm soil profile under straight-tube root irrigation. The aqueduct length of straight-tube root irrigation was 40 cm and water seepage micro-porous were distributed at 30–40 cm end section of the aqueduct. Soil water content was measured by the TDR soil moisture recorder at a time interval of 1 h. Based on the recorded data, the variations in soil water under straight-tube root irrigation was analyzed. The results showed that: 1) for the period of root irrigation, the Logistic curve well described the variations in soil water content with irrigation time. After the stop of irrigation, however, the variation in soil water content degeneration was best described by power function model. 2) The maximum soil water infiltration rates of different layers were in the ranked sequence of 60 cm > 40 cm > 80 cm > 100 cm > 20 cm. The shortest time needed to reach the maximum infiltration rate was in the 40 cm soil layer (with an average time of 1.22 h) and the longest time was in the 100 cm soil layer (with an average time of 4.57 h). The average maximum infiltration rate of 1 m soil profile was 1.65%·h^{-1} and the average time needed to reach the maximum infiltration rate of 1 m soil profile was 2.16 h. 3) Based on the fitted curves, it was suggested that the optimum straight-tube root irrigation cycle of *H. lonammodendron* forest in Shapotou was approximately 4 d and each single irrigation time was 6–10 h. 4) After stopping irrigating for 2 h, the rate of recession of soil moisture increased with increasing soil depth. Also after stopping irrigation for 48 h, the rate of degeneration of soil water content in all soil layers was almost zero. During the growing period of *H. lonammodendron*, the rate of degeneration of soil water in the 1 m soil layer reached the maximum of 2.20%·h^{-1} during grain-filling period and reached the minimum of 1.31%·h^{-1} during aestivation period. 5) The straight-tube root irrigation had the minimal effect on soil water content in the 20 cm soil layer, but the biggest influence on the 60 cm soil layer. During irrigation, the constant value line of soil water content centered on the 60 cm deep line which radially distributed into the surface and deep soil layers. After irrigation, average soil water contents in the 20 cm and 60 cm soil layers were significantly different ($P < 0.05$) from those of the other layers. The research showed that the law of soil water infiltration in straight-tube root irrigation followed the Logistic curve, the regression rule followed the power function curve, and the straight-tube root irrigation had the minimum impact on soil water in the 20 cm layer and had the maximum impact on soil water in the 60 cm layer. The irrigation cycle of straight-tube root irrigation for *H. lonammodendron* in Shapotou Area was approximately 4 days and the recommended single irrigation time was 6–10 h.
Keywords: Artificial sand fixation forest; Straight-tube root irrigation; Soil water; Infiltration; Regression; Irrigation cycle

在极端干旱荒漠地区，水分是制约生态格局和过程的关键非生物限制因子[1]，提高作物水分利用效率是解决农业水资源匮乏的重要途径[2]。节水灌溉技术是提高水分利用率的最直接方法，直插式根灌技术是依托于传统滴灌设施，采用直插式渗灌滴头和导水微管将灌溉水直接输送至植物根系土壤层，实现了灌溉水分低蒸发损失、甚至无蒸发损失[3-4]的新型灌溉技术，统称根灌。土壤中水分的运动、分布和存储受土壤自身性质和地表水、地下水等各种因素的影响而表现出不同的时空动态特征[5]。研究直插式根灌条件下的土壤水分变化规律，能够制定合理的灌溉制度，最大限度地节约水资源。

直插式根灌技术属于地下灌溉技术，其创新之处在于将灌溉水直接引灌到一定深度的植物根系分布层，实现了土壤的越层灌溉，降低土壤水分蒸发损失，提高了灌水效率。直插式根灌技术在灌溉过程中也存在一些不足，其出水孔为点源，在重力、土壤毛细管力等共同作用下，土壤湿润体呈不规则的椭球形分布[4]，造成土壤含水量的空间不均匀分布。该技术需要地表布置供水毛管，地下插入导水微管，所以不适合灌溉小麦等密植型一年生作物，适合灌溉枣树、果树等疏植型多年生作物。但与其他地下滴灌技术相比，直插式根灌技术在节约成本、工程布置等多方面具有优势。

目前对直插式根灌的研究，主要集中于节水潜力、灌溉制度、土壤水分变化趋势分析等方面。杜虎林等[4]在塔里木公路防护林的试验表明，直插式根灌技术比地表滴灌节水 30%以上；鲍忠文等[6]在塔里木河下游骏枣(*Jun-jujube*)林的蒸发试验表明，在同等气象和流量条件下，地表滴灌土壤蒸发损失比直插式根灌高 1 倍；马文艺等[7]在新疆枣树林的研究表明，直插式根灌周期内，土壤水分在 40~60 cm 土层分布稳定，灌溉周期前期土壤水分消退集中于 20 cm 土层，后期集中于 80 cm 土层；杜虎林等[8]的研究表明，新疆枣树林直插式根灌后土壤水分日平均递减率为 0.69%，平均灌溉周期为 22 d。但对直插式根灌过程中，土壤水分的变化规律的分析与模拟研究尚属空白，而地表滴灌在土壤水盐运移与分布规律的研究[9-13]、水肥耦合效应研究[14-19]、土壤水分运移的数值模拟[20-23]等方面的研究都已相当成熟。沙坡头地区降雨稀少，蒸发强烈，地下水水位较深，农业生产和人工固沙林多依靠地下水灌溉，地下水超采严重，最大取水井开采深度已达 380 m。目前该区灌溉方式多采用地表滴灌、漫灌等方式，强烈的

蒸发和渗漏损失使灌溉水分利用效率低下。该区地处腾格里沙漠东南缘，属于包兰铁路沙坡头段的人工固沙植被防护区，为保证铁路安全运营，维持该区生态平衡，培植固沙植物、防风固沙是该地区的首要任务。为提高造林过程中的水分利用效率，在两年生固沙梭梭(*Haloxy lonammodendron*)林展开直插式根灌试验，试验于 2015 年 4—11 月进行，通过研究人工培植梭梭林不同生长期土壤水分变化，初步分析和模拟直插式根灌过程中土壤水分入渗和消退规律，为该地区培植防风固沙林、维持生态平衡以及农业生产，提供高效节水的灌溉技术，制定最优化的灌溉制度提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于2015年4—11月在宁夏中卫环保生态示范基地进行。试验区位于腾格里沙漠东南缘，中卫市沙坡头区西(37°52′N,105°07′E)，迎闫公路旁。总面积433.33 hm^2，平均海拔1 400 m，处于阿拉善高原荒漠与荒漠草原过渡地带，属草原化荒漠，是我国典型的荒漠生态类型自然保护区[24]。该区年平均气温9.8 ℃，最高气温38.2 ℃，最低气温−25 ℃，冬夏昼夜温差大；年平均降雨量185.6 mm，降雨主要集中在7—9月；年蒸发量2 500~3 000 mm；空气平均相对湿度39.1%，最低可到10%；该地区的年平均风速2.7 m·s^{-1}，最大风速为19.3 m·s^{-1}，>5 m·s^{-1}的起沙风每年有196 d左右(沙坡头气象站1956—2013年气象资料)。土壤基质为疏松、贫瘠的流动风沙土，土壤质地为砂土，以粉粒(0.01~0.05 mm)和细沙(0.05~0.25 mm)为主，沙层稳定含水量仅2%~3%，田间持水量为14.8%，表层土壤容重1.47 g·cm^{-3}。地下水埋深达80 m，不能为植物所利用[25]，天然植被以花棒(*Hedysarum scoparium*)、沙米(*Agriophyllum squarrosum*)和油蒿(*Artemisia ordosica*)为主。

试验地为两年生人工培植梭梭林，流动沙丘经平整、麦草方格固定后培植梭梭幼苗，梭梭成活率为95%，成活梭梭长势良好，平均株高为0.5 m。试验区面积为2.67 hm^2，梭梭行距为2 m，株距为2 m。

1.2 试验设计

直插式根灌产品由杜虎林发明专利(专利号: 201120255632.4)，由中国常州博力特塑业有限公司生产，材质为塑料，试验用滴头流量为 4 L·h^{-1}，导水微管外径 13.0 mm，内径 5.5 mm，长度 40 cm，在导水微管 30~40 cm 处均匀分布一定数量的渗水微孔，渗水微孔直径 1~1.2 mm，灌水结束后导水管中无积水。根灌示意图如图 1。

本试验采用中国辽宁锦州阳光气象科技有限公司生产的 PC-2S 型土壤温湿度监测系统测定土壤水分，该系统土壤水分传感器工作原理为时域反射技术(TDR)。在距离根灌滴头 10 cm 处，挖 1 m 深土壤剖面，在挖好的同一垂直剖面上，距地表 20 cm 为起点，间隔 20 cm 垂直于剖面水平插入 5 个土壤水分传感器，原位不间断监测土壤体积含水量的动态变化。TDR 探针长度为 8.5 cm，TDR 测定的土壤水分数值为体积含水量，分辨率为 0.1%，测量范围为 0~100%，精度为±2%。

根灌试验的滴头间距与梭梭株距相同，毛管间距与梭梭行距相同，为减少试验误差，选取长势良好的 3 株相邻梭梭进行试验，试验在相邻滴头对应的梭梭生长剖面上做 3 个重复，滴头之间垂直埋入 1.5 m 深、2 m 宽隔水塑料布，防止相互影响。TDR 记录仪不间断采集 3 个剖面上土壤体积含水量变化数据，采集时间间隔为 1 h，分析灌溉过程和消退过程中土壤含水量的变化规律。

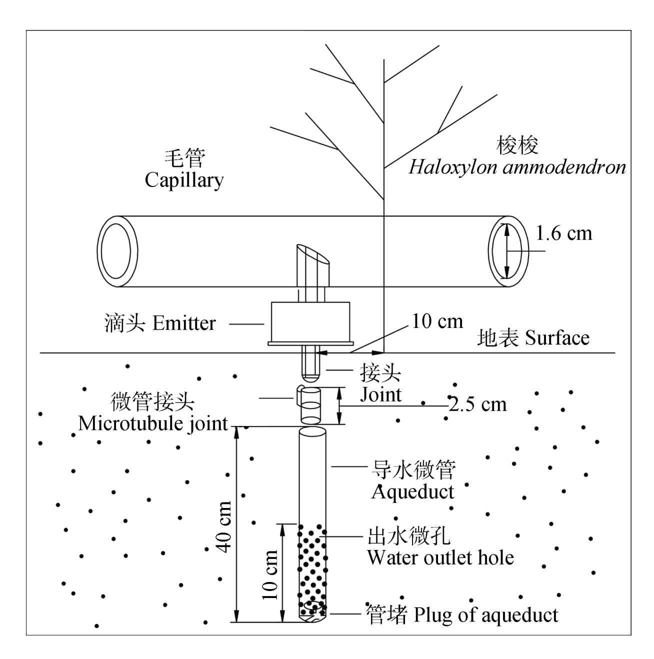


图 1 直插式根灌示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the straight-tube root irrigation

试验于 2015 年 4 月 7 日布置，灌溉周期和灌溉时间依照当地在滴灌灌溉的经验进行，梭梭每年春秋两季是生长的高峰时段，7—8 月经历夏休眠过程，所以选取梭梭萌芽期 4 月 15 日灌溉 17 h、5 月 13 日灌溉 10 h，花期 6 月 22 日灌溉 24 h，夏眠期 8 月 7 日灌溉 23 h，结实期 9 月 5 日灌溉 13 h，种子成熟期 10 月 20 日灌溉 9 h。其中萌芽期春灌选取两次灌溉数据，其余生长时期均选取 1 次灌溉数据，全生

长期共选取灌溉周期内无降雨的 6 次根灌试验数据，试验过程中梭梭长势良好。对根灌过程中土壤水分变化的平均值、极差、标准差及变异系数进行描述性统计，对平均值进行显著性分析，并绘制灌溉过程中 1 m 深土层土壤水分等值线图，进行土壤水分的时空变异特征和动态分布规律研究。

1.3　数据处理

文中土壤含水量均为土壤体积含水量，平均值计算采用算术平均法；表格、散点图、折线图均采用 Microsoft Excel 2007 完成；土壤水分等值线图绘制采用 Surfer 13.0 完成，用 SPSS 19.0 进行数据统计与分析，其他图件处理用 Auto CAD 2013 以及 Photoshop CS6 完成。

2　结果与分析

2.1　直插式根灌条件下梭梭不同生长期土壤水分入渗规律分析

2.1.1　不同土层土壤含水量变化

6 次根灌试验不同土层土壤水分变化表明(图 2)，根灌过程中，各土层土壤含水量的增加趋势可分为 3 个阶段：灌水初期土壤含水量增加比较缓慢；灌水 1~5 h，土壤含水量呈直线增加，之后土壤含水量达最大值，基本保持稳定。灌水 1 h 后，从表土层到深土层，土壤平均含水量依次为 1.38%、2.15%、2.47%、1.55%、0.9%；灌水 5 h 后，依次为 2.63%、7.77%、12.27%、9.4%、6.68%。直插式根灌过程中土壤含水量(y)随灌水时间(x)的变化可用 Logistic 方程拟合:

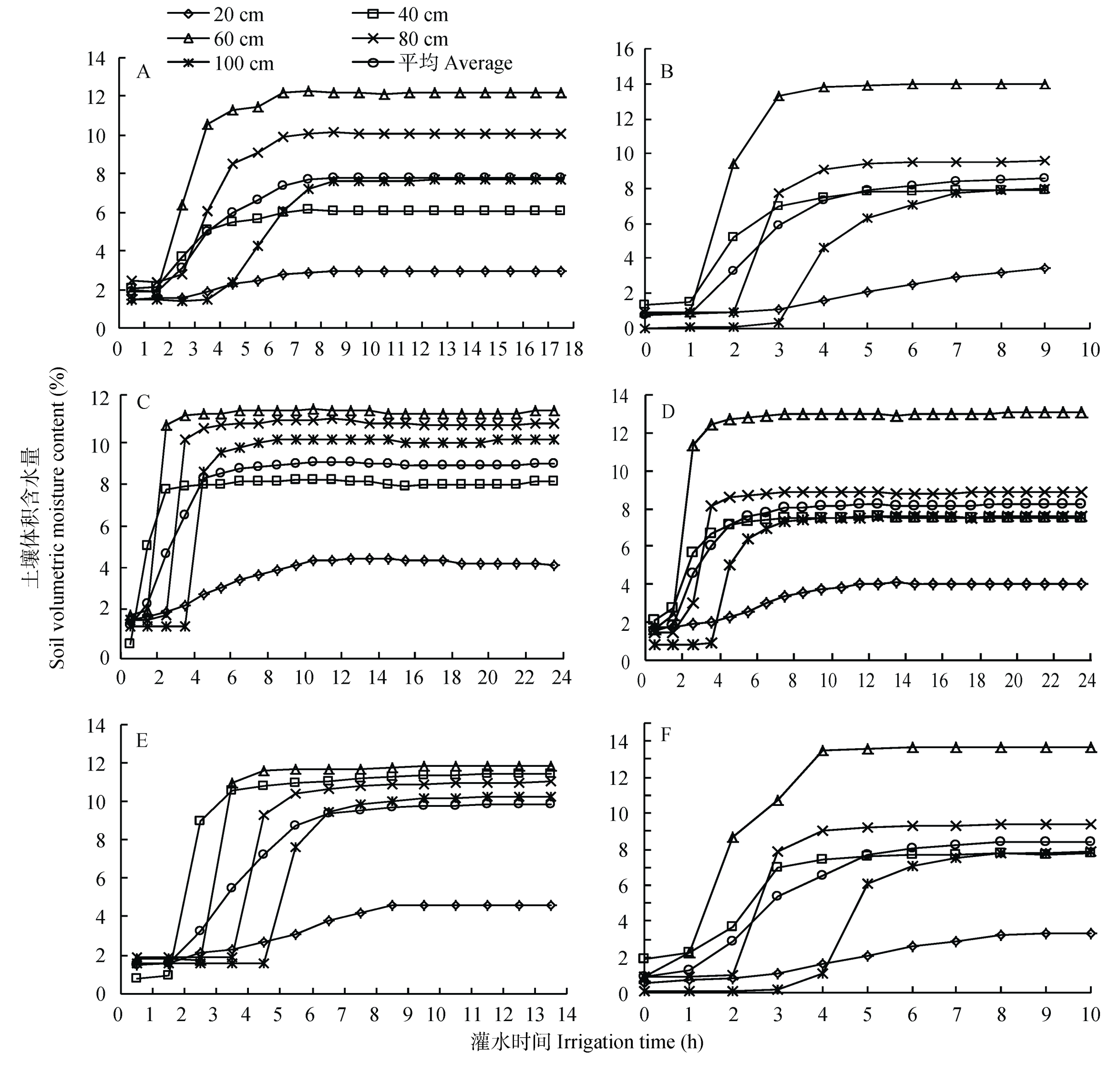


图 2　梭梭不同生长期根灌土壤水分入渗变化

Fig. 2　Soil water infiltration changes at different growth periods of *Haloxylon ammodendron* under straight-tube root irrigation

图 A、B、C、D、E、F 分别为 4 月 15 日灌溉 17 h、5 月 13 日灌溉 10 h、6 月 22 日灌溉 24 h、8 月 7 日灌溉 23 h、9 月 5 日灌溉 13 h、10 月 20 日灌溉 9 h 的土壤含水量变化。The figure A, B, C, D, E and F are soil water content changes at April 15th with irrigation for 17 h, May 13th with irrigation for 10 h, June 22nd with irrigation for 24 h, August 7th with irrigation for 23 h, September 5th with irrigation for 13 h, and October 20th with irrigation for 9 h.

$$y=K/(1+A\times e^{-Bx}) \tag{1}$$

式中: y 为土壤体积含水量(%), x 为灌水时间(h), K、A、B 为曲线参数。梭梭花期和结实期生长最旺盛, 故以梭梭花期和结实期两次灌水为例, 用 Logistic 方程拟合两次灌溉不同土层土壤体积含水量(y)随灌水时间(x)的变化。方程中 3 个参数 K、A、B, K 的初始值通过四点法确定, A 和 B 的初始值通过最小二乘法原理确定[26-27]。不同土层土壤体积含水量随时间变化的拟合结果如表 1, 经检验模拟方程均达极显著水平。根据模拟方程, 可计算不同土层在某一灌水时刻的土壤含水量。实际测定 6 次试验的平均滴头流量为 3.63 L·h^{-1}, 由于试验地特殊的砂质土壤属性, 土壤渗透系数很大。根灌 1~4 h 后, 除 20 cm 土层外, 其余土层的土壤含水量迅速增加, 此阶段约为 2 h; 灌后 4~6 h 后各土层土壤含水量达最大值, 40 cm 土层为 8.05%, 60 cm 土层为 12.5%, 80 cm 土层为 9.58%, 100 cm 土层为 7.47%。此后继续灌水, 各土层土壤含水量基本保持不变。据此建议在滴头流量为 4 L·h^{-1} 时, 该地单次直插式根灌最短灌溉时间为 6 h, 灌水 6 h 时土壤含水量基本达最大值。由于直插式根灌的出水孔分布在 30~40 cm 深, 灌溉水首先到达地表以下 30~40 cm 的位置, 深层土壤水分主要通过毛细管力和植物根系吸水力向表层土壤(0~30 cm)运移, 试验地 0~100 cm 土壤均为砂土类型, 毛管运力较弱, 加之表层土壤蒸发强烈, 0~20 cm 土层土壤含水量增加缓慢, 灌水后 8~9 h 达最大值, 平均为 3.68%, 20 cm 土层平均土壤最大含水量比其他土层低 3.79%~8.28%。

表 1 梭梭花期、结实期不同土层土壤含水量(y)随灌水时间(x)变化的 Logistic 拟合方程[$y=K/(1+A\cdot e^{-Bx})$]

Table 1 Logistic regression equations [$y=K/(1+A\cdot e^{-Bx})$] of soil water content (y) and irrigation time (x) in different soil layers during florescence and grain filling stages of *Haloxylon ammodendron* under straight-tube root irrigation

土层 Soil layer (cm)	花期 Florescence stage					结实期 Grain filling stage				
	K	A	B	R^2	P	K	A	B	R^2	P
20	4.108	2.035	0.353	0.903	0.003	4.639	4.128	0.412	0.911	0.001
40	7.251	10.507	2.933	0.967	0.001	11.218	542.169	3.835	0.977	0
60	10.054	188.444	3.914	0.957	0.006	11.807	27 969.535	4.253	0.952	0
80	9.591	7 313.948	3.756	0.936	0.008	10.898	26 630.813	2.945	0.949	0
100	8.833	117 896.204	3.349	0.972	0	10.174	200 030.207	2.161	0.977	0

2.1.2 土壤水分入渗速率变化

对式(1)求导可得到土壤水分入渗速率方程:

$$y'=\left[\frac{K}{1+A\times e^{-B\cdot x}}\right]'=\frac{K\times A\times B\times e^{-B\cdot x}}{\left(1+A\times e^{-B\cdot x}\right)^2} \tag{2}$$

代入各参数(K、A、B), 可得出土壤水分入渗速率随时间变化的方程。以花期和结实期为例, 灌水时间为横坐标, 土壤水分入渗速率为纵坐标, 得到单次灌水不同土层土壤水分入渗速率变化曲线(图 3)。从图 3 可知, 根灌过程中 20 cm 土层土壤水分入渗速率变化较小, 花期灌水 2.37 h 达到最大值 0.36%·h^{-1}, 结实期灌水 3.44 h 达到最大值 0.49%·h^{-1}。花期灌水 10 h 土壤水分入渗速率下降到 0.09%·h^{-1}, 之后逐渐降低, 至灌水末期基本为零; 结实期灌水 10 h 下降到 0.12%·h^{-1}, 灌水末期下降到 0.03%·h^{-1}。其余土层土壤水分入渗速率呈尖锐的抛物线变化, 60 cm 土层最大入渗速率均高于其他土层, 花期出现在灌水 1.34 h, 达 9.84%·h^{-1}, 结实期出现在灌水 2.41 h, 达 12.55%·h^{-1}。6 次根灌试验, 不论灌水时间长短, 1 m 深土层平均土壤水分入渗速率, 在灌水 0~10 h 变化明显, 灌水 1~6 h 各土层均达最大值, 之后逐渐降低, 灌水 10 h 后入渗速率均小于 0.01%·h^{-1}。说明根灌 10 h 后, 各土层土壤水分基本不再增加, 结合试验地砂质土壤特性, 当灌溉时间超过 10 h 时, 灌溉水分基本 100%损失。据此, 建议 10 h 为试验区直插式根灌最大灌溉时间。

对式(2)进行求导可得式(3), 据式(3)可求得土壤水分入渗的最大速率。

$$y''=\left[\left(\frac{K}{1+A\times e^{-B\cdot x}}\right)'\right]'=\frac{B^2\times K\times A\times e^{-B\cdot x}\left(A\times e^{-B\cdot x}-1\right)}{\left(1+A\times e^{-B\cdot x}\right)^3} \tag{3}$$

当 $y''=0$ 时, 对应的 $x=(\ln A)/B$ 为土壤水分最大入渗速率出现的时间, x 对应的 y 为最大入渗速率。据式(3)计算花期和结实期两次灌溉不同土层土壤水分入渗速率及其出现的时间, 并计算 6 次根灌试验, 1 m 深土层土壤水分入渗速率及其出现的时间。结果表明(表 2), 花期和结实期两次灌溉, 不同土层土壤水分达到最大入渗速率的时间长短依次为 40 cm<60 cm<20 cm<80 cm<100 cm; 40 cm 土层最短, 花期为 0.82 h, 结实期为 1.64 h; 100 cm 土层最长, 花期

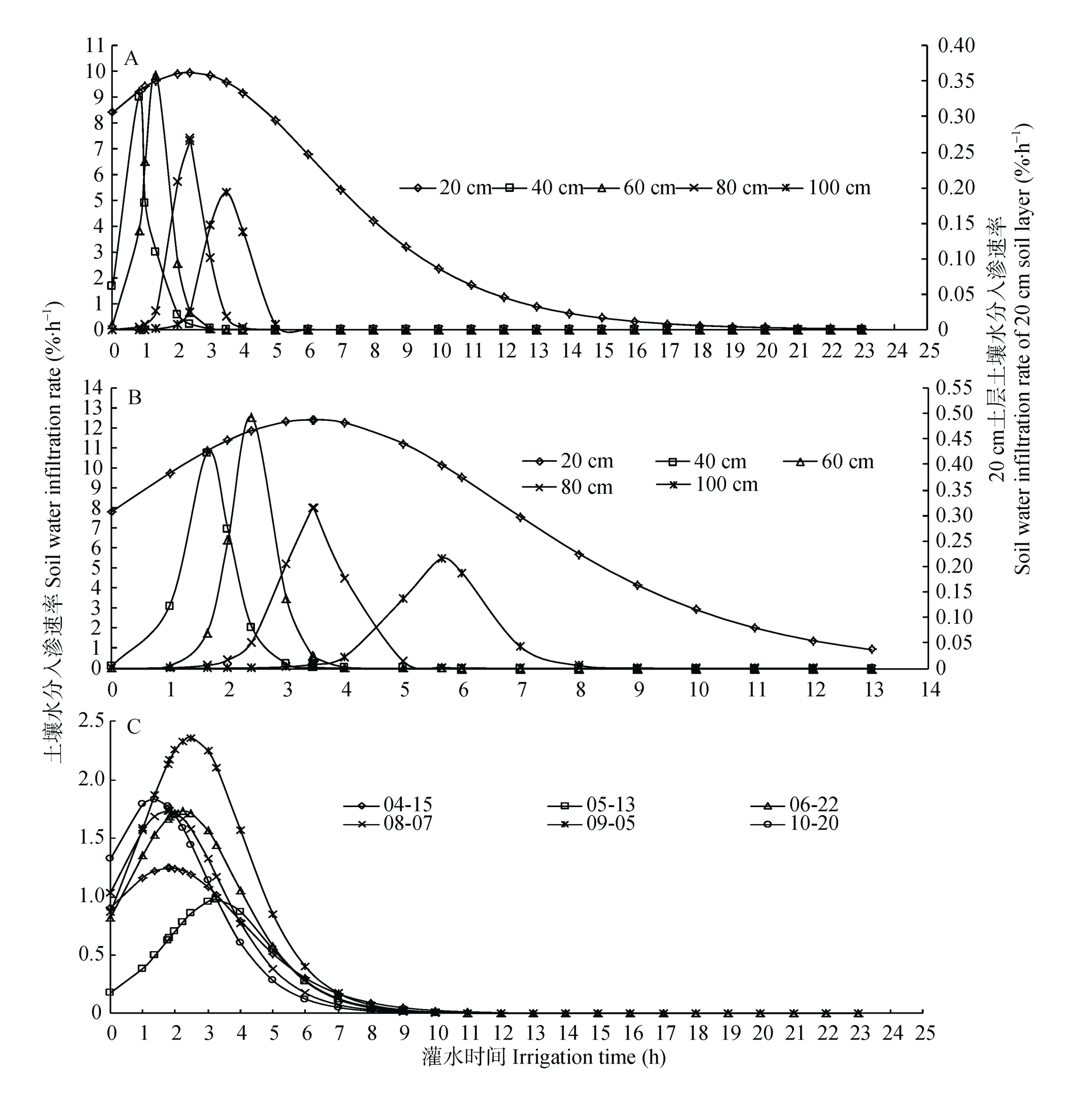


图 3　梭梭根灌土壤不同土层水分入渗速率变化(A, B)及不同日期(月-日)1 m 深土层平均水分入渗速率变化(C)

Fig. 3　Changes of infiltration rates of soil water in different soil layers (A, B) and average infiltration rate of soil water in 1 m deep soil layer at different dates (month-day) (C) of *Haloxylon ammodendron* forest under straight-tube root irrigation

图 A、B 分别为梭梭花期(6 月 22 日)、结实期(9 月 5 日)两次灌溉不同土层土壤水分入渗速率变化；由于 20 cm 土层土壤水分入渗速率变化较小，所以对 20 cm 土层添加次坐标轴，土壤水入渗速率以右侧纵坐标为标准；其余土层以左侧纵坐标为标准。图 C 为 6 次灌溉(0~1 m 深度)平均土壤水分入渗速率变化。Figure A and B respectively show variations of water infiltration rates at different soil layers after two root irrigations at *Holoxylon ammodendron* florescence (June 22nd) and grain filling periods. Due to little infiltration rate variation at the 20 cm layer, a secondary axis (right *Y*-axis) is added for 20 cm soil layer. Figure C shows the average soil water infiltration rates of 0–1 m soil profile of 6 irrigations.

表 2　梭梭根灌土壤不同土层水分最大入渗速率及其出现时间及 1 m 深土层平均水分最大入渗速率及其出现时间

Table 2　Maximum infiltration rate of soil water in different layers and its occurrence time, and the average maximum infiltration rate of soil water in 1 m deep soil layer and its occurrence time of *Haloxylon ammodendron* forest under straight-tube root irrigation

花期 Florescence stage			结实期 Grain filling stage			全生长期 Whole growth period		
土层 Soil layer (cm)	出现时间 Occurrence time (h)	最大入渗速率 Maximum infiltration rate (%·h⁻¹)	土层 Soil layer (cm)	出现时间 Occurrence time (h)	最大入渗速率 Maximum infiltration rate (%·h⁻¹)	试验时间(月-日) Test time (month-day)	出现时间 Occurrence time (h)	最大入渗速率 Maximum infiltration rate (%·h⁻¹)
20	2.37	0.36	20	3.44	0.49	04-15	1.82	1.25
40	0.80	9.00	40	1.64	10.76	05-13	3.27	0.97
60	1.34	9.84	60	2.41	12.55	06-22	2.23	1.73
80	2.38	7.42	80	3.46	8.02	08-07	1.76	1.74
100	3.49	5.34	100	5.65	5.50	09-05	2.49	2.36
						10-20	1.37	1.83

为 3.49 h，结实期为 5.65 h。各土层最大入渗速率依次为 60 cm>40 cm>80 cm>100 cm>20 cm, 60 cm 土层最大，花期为 9.84%·h^{-1}，结实期为 12.55%·h^{-1}; 20 cm 土层最小，花期为 0.36%·h^{-1}，结实期为 0.49%·h^{-1}。6 次根灌试验，1 m 深土层土壤水分达到最大入渗速率的时间平均为 2.16 h，最大入渗速率平均为 1.65%·h^{-1}。

2.2 直插式根灌条件下梭梭土壤水分消退规律

根据 TDR 数据，分析停灌后 48 h 内各土层土壤含水量及 1 m 深土层土壤平均含水量消退规律(图 4)，除 20 cm 土层变化不明显外，其余土层土壤含水量在停灌后 0~12 h 迅速消退，之后消退减缓，停灌后 48 h 各土层土壤含水量均消退到 5%以下。除 20 cm 土层变化不明显外，其余土层土壤含水量随时间变化的消退趋势明显呈“L”型分布(图 4)，所以根灌后土壤含水量(y)随时间(x)变化的消退趋势可用幂函数方程模拟。

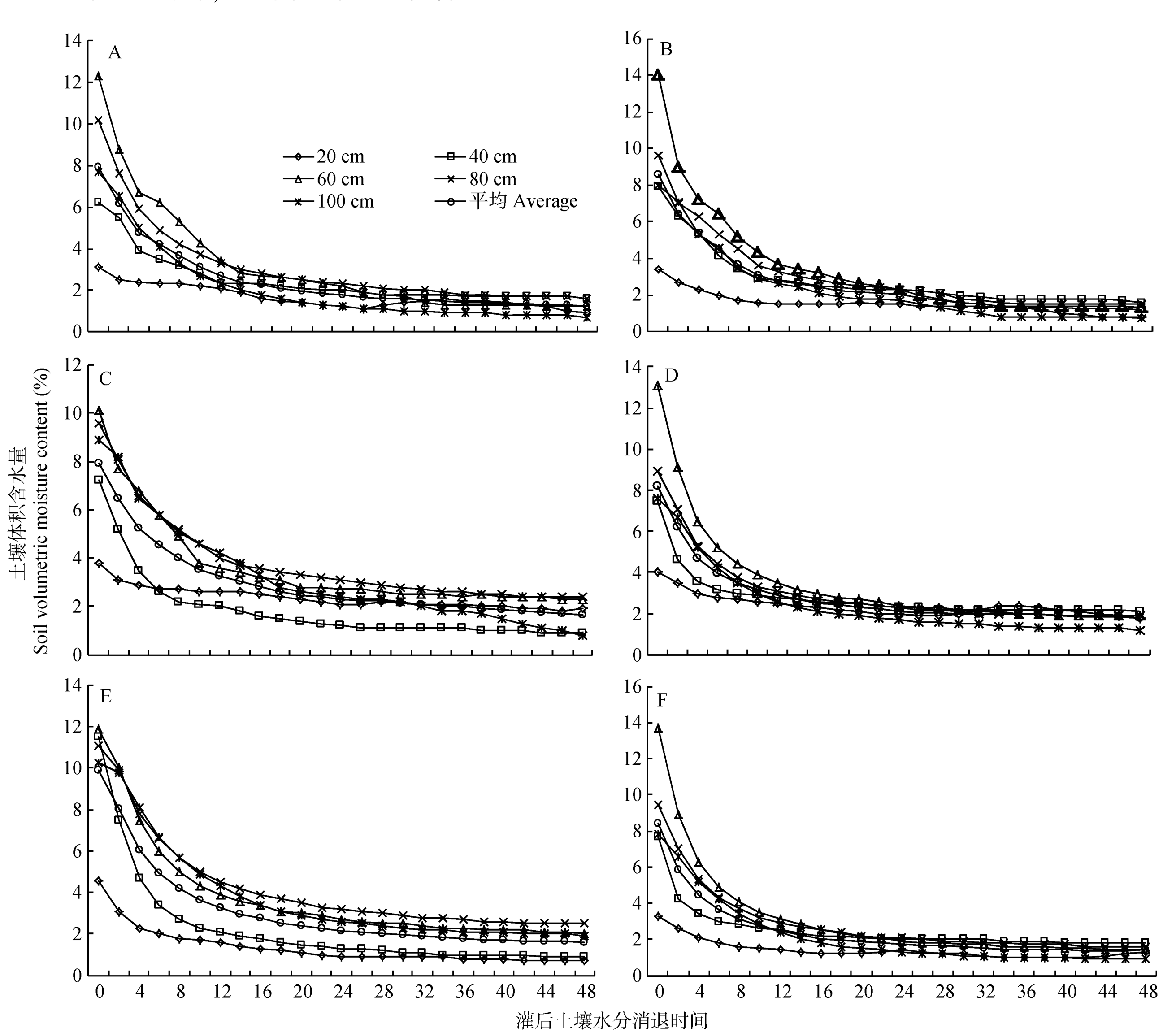


图 4 梭梭不同生长期根灌停止后的土壤水分消退变化

Fig. 4 Soil water regression changes in different growth periods of *Haloxylon ammodendron* after root straight-tube irrigation stopping

图 A、B、C、D、E、F 分别为 4 月 15 日、5 月 13 日、6 月 22 日、8 月 7 日、9 月 5 日、10 月 20 日停灌后的土壤含水量变化。Figure A, B, C, D, E, F, respectively are soil water content changes after irrigation stopping on April 15th, May 13th, June 22nd, August 7th, September 5th, October 20th.

2.2.1 不同土层土壤水分消退规律分析

幂函数方程的一般表达式为:

$$y=C\times x^b \quad (\text{其中 } C、b \text{ 属于实数}) \qquad (4)$$

以梭梭花期和结实期两次根灌为例，对停灌后 48 h 内不同土层土壤含水量(y)随灌水时间(x)的变化，进行幂函数方程拟合，用 F 检验法验证模拟方程的

显著性。拟合结果表明(表 3)，停灌后 48 h 内，不同土层土壤含水量随时间的变化存在幂函数关系，R^2 均大于 0.96。生长期 6 次根灌试验，土壤水分消退模拟结果表明(表 4)，1 m 深土层平均土壤水分消退变化也符合幂函数分布规律，R^2 均大于 0.98。经 F 检验，模拟方程均达极显著水平。根据模拟方程，可以计算出根灌后土壤水分消退过程中，不同土层在某一时刻的土壤含水量；计算两个时刻土壤水分的差值，可得到某一段时间内的土壤水分消退量。据表 3 模拟方程计算，停灌后 48 h, 20 cm 和 40 cm 土层土壤水分均在 1%以下, 60 cm、80 cm、100 cm 土层土壤水分，花期分别为 1.53%、1.71%和 2.34%，结实期分别为 1.32%、1.7%和 1.24%。据表 4 模拟方程计算，停灌 84 h 后, 6 次根灌试验 1 m 深土层土壤平均含水量均小于 1%，随生长期推进, 6 次根灌试验依次为 0.58%、0.54%、0.92%、0.96%、0.74%和 0.62%，此时土壤含水量已接近沙生植物萎蔫系数。所以在不考虑降雨、夜间凝结等环境因素影响下建议灌水周期为 4 d。

表 3　梭梭不同生长期根灌停止后不同土层土壤水分(y)随时间(t)变化的拟合方程($y=C\times x^b$)

Table 3　Fitting equations ($y=C\times x^b$) for relationship between soil water after stopping straight-tube root irrigation (y) and time (t) of different soil layers of *Haloxylon ammodendron* froest

土层 Soil layer (cm)	花期 Florescence				结实期 Grain filling stage			
	C	b	R^2	P	C	b	R^2	P
20	3.75	–0.20	0.961	0	4.64	–0.59	0.990	0
40	7.06	–0.65	0.986	0	10.90	–0.80	0.988	0
60	10.20	–0.49	0.967	0	13.02	–0.59	0.987	0
80	10.53	–0.47	0.990	0	12.75	–0.52	0.987	0
100	14.41	–0.73	0.901	0	13.76	–0.62	0.971	0

表 4　梭梭不同生育时期停灌后 1 m 深土层平均土壤含水量(y)随时间(t)消退的拟合方程($y=C\times x^b$)

Table 4　Fitting equations ($y=C\times x^b$) for relationship between average soil water content of 1 m soil layer after stopping straight-tube root irrigation (y) and time (t) at different growth stages of *Haloxylon ammodendron*

生长时期 Growth period	灌水时间(月-日) Irrigation time (month-day)	C	b	R^2	P
萌芽期 Seeding emergence stage	04-15	9.03	–0.62	0.990	0
	05-13	10.13	–0.66	0.989	0
花期 Florescence	06-22	8.78	–0.51	0.993	0
夏眠期 Aestivation stage	08-07	7.72	–0.47	0.988	0
结实期 Grain filling stage	09-05	11.01	–0.61	0.990	0
种子成熟期 Seed maturity stage	10-20	8.03	–0.58	0.986	0

2.2.2　土壤水分消退速率变化

对式(4)求导，可得土壤水分消退速率方程，考虑到速率的实际意义，求出导函数的绝对值，即：

$$y'=\left|C\times b\times x^{(b-1)}\right| \tag{5}$$

以花期、结实期为例，梭梭单次灌水后，不同土层土壤水分消退速率随时间变化趋势如图 5 A、图 5 B 所示；6 次根灌试验后，1 m 深土层平均土壤水分消退速率变化趋势如图 5C 所示。单次根灌后，各土层土壤水分消退速率随时间变化逐渐减小。停灌后 2 h，各土层土壤水分消退速率依次为 100 cm>80 cm>60 cm>40 cm>20 cm，消退速率 100 cm 土层最大，为 3.17%·h^{-1}，20 cm 土层最小，为 0.33%·h^{-1}；停灌后 24 h，花期和结实期各土层土壤水分消退速率均小于 0.06%·h^{-1}，从表土层到深土层，花期依次为 0.02%·h^{-1}、0.02%·h^{-1}、0.04%·h^{-1}、0.05%·h^{-1} 和 0.04%·h^{-1}，结实期依次为 0.02%·h^{-1}、0.03%·h^{-1}、0.05%·h^{-1}、0.05%·h^{-1} 和 0.05%·h^{-1}；停灌后 48 h，各土层土壤水分消退速率基本为零。6 次根灌试验停灌后 2 h, 1 m 深土层土壤水分平均消退速率在结实期最大，为 2.20%·h^{-1}，休眠期最小，为 1.31%·h^{-1}; 1 m 深土层土壤水分平均消退速率停灌后 10 h 骤降，平均从 1.84%·h^{-1} 下降至 0.17%·h^{-1}，下降率超过 90%；停灌 24 h 后土壤水分平均消退速率均小于 0.1%·h^{-1}，随梭梭生长期推进，6 次根灌试验依次为 0.03%·h^{-1}、0.03%·h^{-1}、0.09%·h^{-1}、0.03%·h^{-1}、0.04%·h^{-1} 和 0.03%·h^{-1}，停灌 48 h 后消退速率基本为零。

2.3　直插式根灌条件下梭梭不同生育时期土壤水分垂直变化分析

对梭梭全生长期 6 次根灌试验不同土层土壤水分变化进行描述性统计，并对不同土层平均土壤含

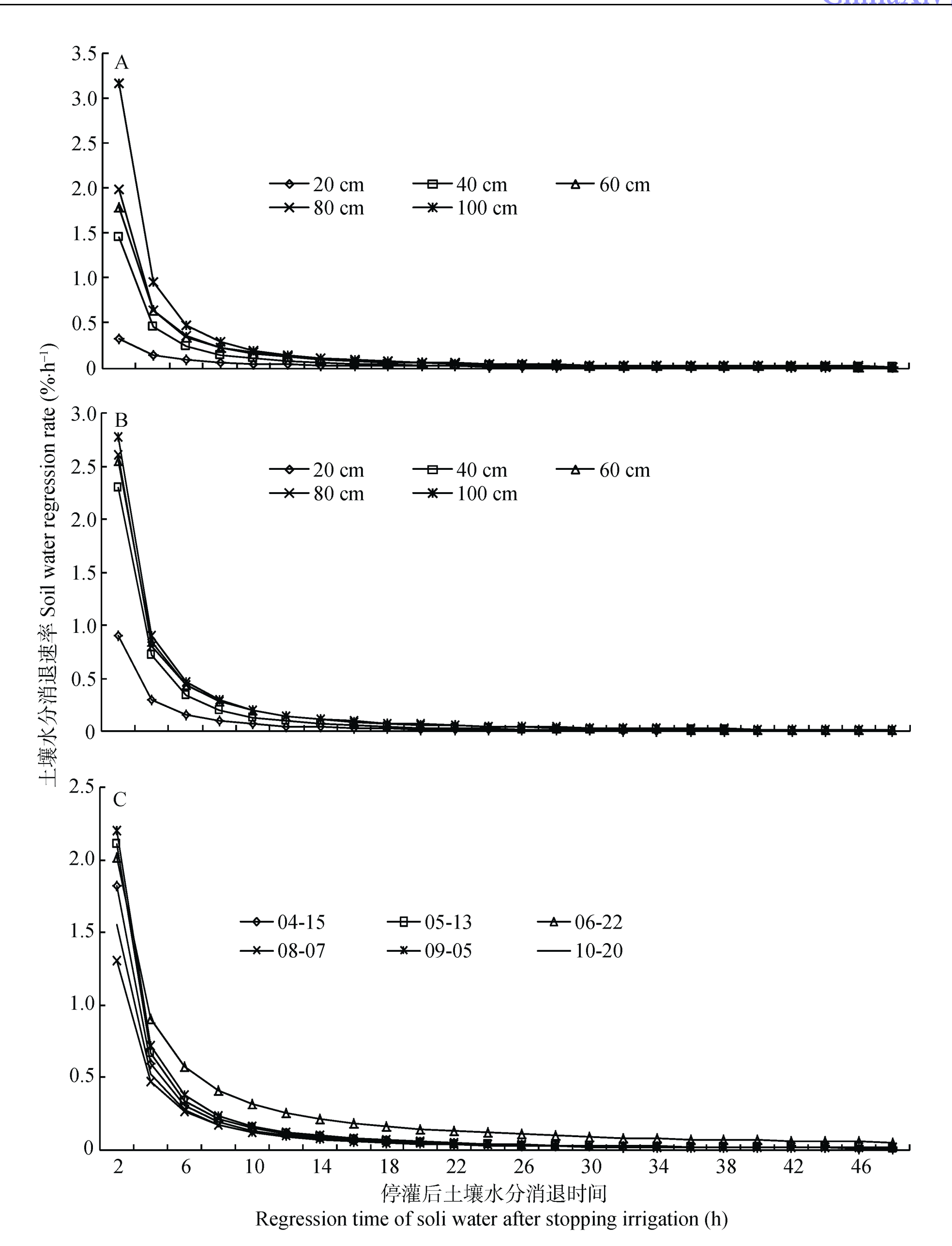


图 5 梭梭根灌土壤停灌后不同土层土壤水分消退速率变化(A, B)及 **1 m** 深土层土壤水分平均消退速率**(C)**变化

Fig. 5 Changes for regression rates of soil water in different soil layers (A, B) and average regression rate of soil water at 1 m deep soil layer (C) after stopping straight-tube root irrigation of *Haloxylon ammodendron*

图 A、B 分别为梭梭花期(6 月 22 日)、结实期(9 月 5 日)停灌后不同土层土壤水分消退速率变化，图 C 为梭梭全生长期 6 次根灌试验停灌后 1 m 深土层平均土壤水分消退速率变化。Figure A and B show the regression rates change of soil moisture in different soil layers after stopping irrigation at florescence (June 22nd) and grain filling stagein (September 5th), respectively. Figure C is the average soil water regression rate change in 1 m layer after stopping of 6 irrigations during the whole growth period of *Haloxylon ammodendron*.

水量进行单因素 ANOVA 方差分析(表 5)。结果表明，根灌试验前后，各土层土壤含水量变异系数大小次序为 100 cm>80 cm>60 cm>20 cm>40 cm，100 cm 土层最大，平均为 59.45%，40 cm 土层最小，平均为 31.04%；灌溉过程中土壤水分变化极差大小依次为 60 cm>80 cm>100 cm>40 cm>20 cm；灌后，各土层平均土壤含水量之间的差异显著性表明，20 cm 和 60 cm 土层与其他各土层之间差异显著(P<0.05)，40 cm 与 80 cm 土层之间差异不显著(P<0.05)。6 次根灌试验过程中，不同土层土壤含水量的等值线分布图(图 6)表明，60 cm 土层附近土壤含水量等值线最密集，20 cm 土层附近土壤含水量等值线最稀疏，土壤水分等值线在 60 cm 处形成斑块，等值线呈现出以 60 cm 土层为中心，向表层和深层土壤辐射状分布。说明根灌过程中 60 cm 土层土壤含水量的空间异质性最高，20 cm 土层土壤含水量的空间异质性最低。

表 5　梭梭不同根灌时间各土层土壤含水量描述性统计结果

Table 5　Descriptive statistics of soil water content at each soil layer in different straight-tube root irrigation times of *Haloxylon ammodendron*

根灌时间(月-日) Root irrigation time (month-day)	土层深度 Soil depth (cm)	平均值 Average (%)	最大值 Maximum (%)	最小值 Minimum (%)	极差 Range (%)	标准差 Standard deviation (%)	变异系数 CV (%)
04-15	20	2.62c	3.00	1.50	1.50	0.67	25.57
	40	5.42b	6.02	2.10	3.92	1.23	22.69
	60	10.56a	12.30	1.90	10.40	3.42	32.39
	80	8.47b	10.20	2.40	7.80	2.89	34.12
	100	5.69c	7.70	1.40	6.30	2.71	47.63
05-13	20	1.93c	3.40	0.80	2.60	1.03	53.37
	40	6.18b	7.90	1.30	6.60	2.65	42.88
	60	10.82a	14.00	0.90	13.10	5.41	50.00
	80	6.70b	9.60	0.90	8.70	4.04	60.30
	100	4.21b	8.00	0.00	8.00	3.65	86.70
06-22	20	3.44d	4.10	1.60	2.50	0.82	23.84
	40	6.76bc	7.30	0.60	6.70	1.41	20.86
	60	9.35a	10.20	1.80	8.40	2.30	24.60
	80	8.57b	9.80	1.60	8.20	2.67	31.16
	100	7.52c	8.90	1.30	7.60	2.86	38.03
08-07	20	3.43d	4.10	1.80	2.30	0.85	24.78
	40	6.95bc	7.60	2.10	5.50	1.45	20.86
	60	11.98a	13.10	1.70	11.40	3.08	25.71
	80	7.96b	8.90	1.50	7.40	2.32	29.15
	100	6.25c	7.60	0.80	6.80	2.54	40.64
09-05	20	3.49d	4.60	1.50	3.10	1.43	40.97
	40	9.57b	11.50	0.80	10.70	3.65	38.14
	60	9.59a	11.90	1.70	10.20	4.25	44.32
	80	8.19b	11.10	1.90	9.20	4.15	50.67
	100	6.88c	10.30	1.60	8.70	4.14	60.17
10-20	20	2.61d	3.30	0.60	2.70	1.10	42.14
	40	6.24b	7.80	1.90	5.90	2.36	37.82
	60	10.75a	13.70	0.90	12.80	4.81	44.74
	80	6.88b	9.40	0.90	8.50	3.84	55.81
	100	4.16bc	7.90	0.10	7.80	3.72	89.42

同列不同小写字母表示处理间差异达 5%显著水平。Different lowercase letters in the same column mean significant different at 0.05 level.

3　讨论

土壤水分的变化和运移规律，是地表滴灌、膜下滴灌以及地下滴灌技术研究的热点课题，受环境气象因子、立地条件、灌水方式、灌水时间及灌水量等多种因素的影响[12,26-28]。研究内容多集中在地表滴灌和膜下滴灌，研究方法主要集中在室内条件下对灌溉土壤水分运移、分布规律以及对外界环境影响因子进行数值模拟和计算[29]，野外等水头供水条件下不同土质土壤水分入渗模型研究[30]，以及模拟农田土壤水分入渗模型参数的研究[31]。在大田条件下，针对灌溉土壤水分入渗规律的研究较少，直插式根灌是一种新的根灌技术，在砂质土壤研究直插式根灌条件下的土壤水分变化规律具有重要意义。沙土具有毛细管力弱、表层土壤蒸发强、渗透性大的特性。沙坡头区 1 m 深土层均为典型的砂质土壤，灌水前土壤背景含水量极低，灌后土壤水分迅速向周围运移，各层土壤水分缓慢增加；之后由于土壤湿润体的扩展，各层土壤毛细管力增强，土壤水分运移能力增强，土壤水分迅速增加；由于砂质土壤渗透性弱、保水性差，之后继续灌水，土壤水分完全渗漏损失，各层土壤水分基本不再变化，这种变化规律符合 Logistic 曲线变化，可用 Logistic 模型对根灌过程中土壤水分变化进行模拟。停灌后土

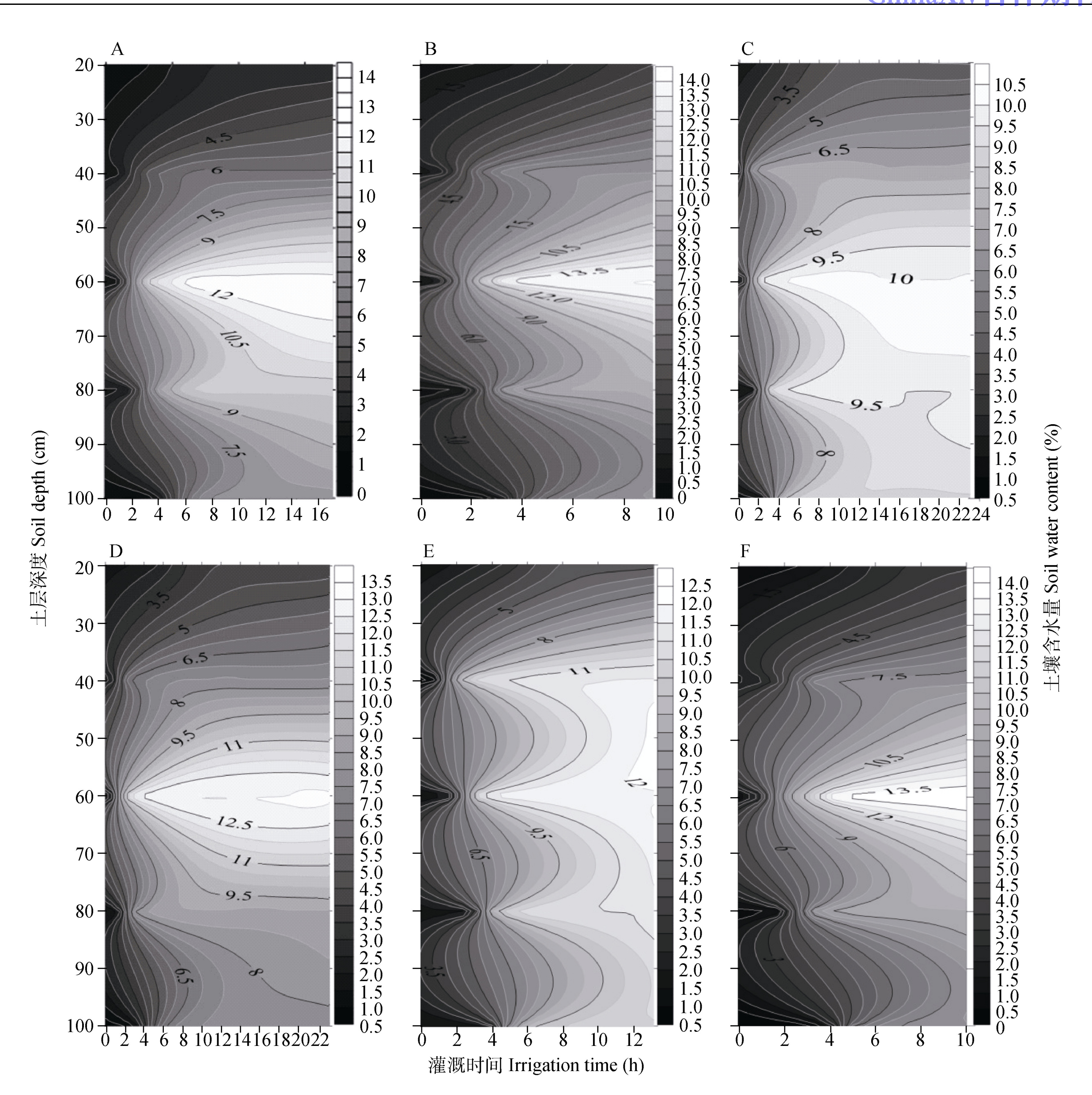


图 6　梭梭全生长期 6 次根灌土壤水分垂直分布等值线

Fig. 6　Isoline maps of vertical distribution of soil water in whole growth period of *Haloxylon ammodendron* of 6 straight-tube root irrigations

图 A、B、C、D、E、F 分别为 4 月 15 日、5 月 13 日、6 月 22 日、8 月 7 日、9 月 5 日和 10 月 20 日根灌灌溉过程中土壤水分分布等值图，图中等值线数值为土壤水分体积分数(%)。The figure A, B, C, D, E, F, respectively, are isoline maps of soil water of root irrigation at April 15th, May 13th, June 22nd, August 7th, September 5th, October 20th; values in figure are soil volumetric moisture content, %.

壤水分除 20 cm 土层消退不明显外，其余土层土壤含水量在停灌后 10 h 内均迅速消退，之后消退量和消退率均大幅减小，土壤含水量的消退趋势呈明显的“L”型分布，这种分布可用幂函数模型进行模拟，这与张志刚等[28]在滴灌条件下土壤水分消退规律研究结果一致。而对于滴灌土壤水分的入渗与再分布过程，假设土壤各项均质时，符合达西定律和质量守恒定律，一般以 Richards 方程和 hydrus 模型为基础进行点源入渗数值模拟研究[32-33]。

土壤水分入渗速率，能够表征在一定滴头流量下，各层土壤达到最大湿润程度的时间快慢，对制定合理的灌水时间具有重要意义，该指标由流量、灌水技术、土壤质地、环境要素等主要因素决定。试验表明，直插式根灌过程中，各土层土壤水分达到最大入渗速率的时间 40 cm 土层最短，100 cm 土层最大，这是因为直插式根灌的导水管出水孔分布在 30~40 cm，灌溉水首先到达 40 cm 土层，最后入渗到 100 cm 土层；不同土层最大入渗速率依次为 60 cm>40 cm>80 cm>100 cm>20 cm。这种变化，可能是因为滴头流量一定时，砂质土壤渗透性大，灌水后土壤水分迅速渗透到 60 cm 土层，土壤水分充满 60 cm 土层包气带，土壤结合水、薄膜水、毛细

管水均增加。被 60 cm 土层拦截后，灌溉水重力势降低，基质势增加，土壤水分下渗速率减小，土壤水分入渗速率 60 cm 土层最大，表土层由于蒸发强烈，土壤毛细管力弱，水分向 20 cm 土层运移能力弱，故 20 cm 土层土壤水分入渗速率最小。

土壤水分消退速率是表征灌溉停止后，土壤中的水分以蒸腾、蒸发、渗漏等方式损失的速率，减少蒸发、渗漏等无效损失，可降低水分消退速率，提高土体贮水量，间接提高水分利用效率。灌水后各土层都已完全湿润，此时土壤水分重力势大于基质势，100 cm 土层消退速率最大。在不考虑蒸发情况下，土壤水分消退速率应该是 20 cm 土层最小，但是沙坡头区蒸发强烈，对 20 cm 表土层土壤影响最大，导致 20 cm 土层土壤水分消退速率大于 40 cm。故各土层土壤水分消退速率大小依次为 100 cm>80 cm>60 cm>20 cm>40 cm。模拟结果表明，停灌后 4 d，土壤含水量已在 1%以下，需要再一次灌水。研究土壤水分消退速率变化，可以制定直插式根灌条件下的灌溉周期，为高效节水的灌溉制度提供支持。

明确灌溉水垂直变异性和时空分布，可定量地描述灌水过程中和不同土层土壤水分变化程度。灌溉过程中土壤含水量的空间异质性 60 cm 土层最高，20 cm 土层最低。土壤平均含水量 20 cm 和 60 cm 土层与其他各土层之间差异达显著水平，灌溉水对 20 cm 土层影响最小，对 60 cm 土层影响最大。直插式根灌产品成本低廉，田间布置简单，本研究通过对直插式根灌条件下土壤水分变化的分析，初步揭示了沙坡头区砂质土壤条件下，滴头流量为 4 $L\cdot h^{-1}$ 时，梭梭林土壤水分变化规律，初步制定了灌溉制度，可为该地区直插式根灌技术的推广、改进提供理论依据，并为将来研究直插式根灌条件下土壤盐分、溶质等的运移规律提供参考。但该区直插式根灌条件下的实际节水效率、蒸发规律等需要进一步研究。

4　结论

本研究表明，直插式根灌过程中，土壤含水量随灌水时间的变化可用 Logistic 方程拟合，停灌后，土壤水分的消退规律符合幂函数模型变化；不同土层土壤水分达到最大入渗速率的时间 40 cm 土层最短，平均为 1.22 h，100 cm 土层最长，平均为 4.57 h；6 次根灌试验，1 m 深土层土壤水分达到最大入渗速率的平均时间为 2.16 h，最大入渗速率平均为 1.65%$\cdot h^{-1}$。根据模型模拟结果，建议沙坡头区梭梭林直插式根灌灌溉周期为 4 d 左右，单次灌水时间以 6~10 h 为宜；土壤水分入渗速率 60 cm 土层最大，20 cm 土层最小，土壤水分消退速率 100 cm 土层最大，20 cm 土层最小。

直插式根灌过程中，20 cm 土层土壤水分的入渗、分布和消退变化都不明显，60 cm 土层土壤水分的入渗、消退变化最符合模拟结果，直插式根灌对 20 cm 土层土壤水分的影响最小，对 60 cm 土层土壤水分影响最大；灌水过程中，土壤水分等值线呈现出以 60 cm 土层为中心，向表层和深层土壤辐射状分布。

参考文献　References

[1] Kidron G J. Analysis of dew precipitation in three habitats within a small arid drainage basin, Negev Highlands, Israel[J]. Atmospheric Research, 2000, 55(3/4): 257–270

[2] 张喜英. 提高农田水分利用效率的调控机制[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(1): 80–87
Zhang X Y. Regulating mechanisms for improving farmland water use efficiency[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, 21(1): 80–87

[3] Bao Z W, Du H L, Jin X J. Water-saving potential in Aeolian sand soil under straight tube and surface drip irrigation in Taklimakan Desert in Northwest China[J]. Science in Cold and Arid Regions, 2011, 3(3): 243–251

[4] 杜虎林, 王涛, 肖洪浪, 等. 塔里木沙漠公路防护林带根灌节水试验研究[J]. 中国沙漠, 2010, 30(3): 522–527
Du H L, Wang T, Xiao H L, et al. Root irrigation experiments used in the protective forest belt along the Tarim desert highway[J]. Journal of Desert Research, 2010, 30(3): 522–527

[5] 邵立威, 孙宏勇, 陈素英, 等. 根土系统中的根系水力提升研究综述[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(5): 1080–1085
Shao L W, Sun H Y, Chen S Y, et al. An overview of root hydraulic lift in root-soil systems[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011, 19(5): 1080–1085

[6] 鲍忠文, 杜虎林, 史学斌, 等. 用微型蒸渗仪测验根灌节水潜力的田间试验研究[J]. 中国沙漠, 2013, 33(1): 160–166
Bao Z W, Du H L, Shi X B, et al. A comparison between the rhizospheric irrigation and the drip irrigation by monitoring the soil evaporation with micro-lysimeters[J]. Journal of Desert Research, 2013, 33(1): 160–166

[7] 马文艺, 杜虎林, 史学斌. 塔里木河下游枣树根灌需水量与灌溉制度研究[J]. 西北农业学报, 2014, 23(11): 92–99
Ma W Y, Du H L, Shi X B. Water demand and irrigation scheduling of root-zone irrigation for Jujube tree in the downstream area of Tarim River[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2014, 23(11): 92–99

[8] 杜虎林, 马文艺, 冯起, 等. 塔里木河下游垦区枣树灌溉土壤水分变化分析[J]. 中国沙漠, 2014, 34(3): 773–779
Du H L, Ma W Y, Feng Q, et al. Soil moisture variation after irrigation in *Zizipubs jujube* field in the lower reaches of Tarim River[J]. Journal of Desert Research, 2014, 34(3): 773–779

[9] 陈佰鸿, 曹建东, 王利军, 等. 不同滴灌条件下土壤水分分

布与运移规律[J]. 节水灌溉, 2010(7): 6–9
Chen B H, Cao J D, Wang L J, et al. Research on distribution and movement rules of soil water under different drip irrigation conditions[J]. Water Saving Irrigation, 2010(7): 6–9
[10] 张志刚, 李宏, 李疆, 等. 地表滴灌条件下滴灌量对土壤水分入渗、再分布过程的影响[J]. 农业现代化研究, 2016, 37(1): 174–181
Zhang Z G, Li H, Li J, et al. Effects of irrigation amount on soil water infiltration and redistribution under drip irrigation[J]. Research of Agricultural Modernization, 2016, 37(1): 174–181
[11] 陈小三. 地面滴灌及地下滴灌土壤水分运移规律室内试验研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2011: 13–39
Chen X S. Laboratory experimental study on soil-water movement of surface drip irrigation and subsurface drip irrigation[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2011: 13–39
[12] Liu M X, Yang J S, Li X M, et al. Distribution and dynamics of soil water and salt under different drip irrigation regimes in northwest China[J]. Irrigation Science, 2013, 31(4): 675–688
[13] 张金珠, 王振华, 虎胆·吐马尔白. 秸秆覆盖对滴灌棉花土壤水盐运移及根系分布的影响[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(12): 1467–1476
Zhang J Z, Wang Z H, Hudan·TUMAREI. Influence of straw mulching on soil water/salt movement and cotton root distribution under drip irrigation[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, 21(12): 1467–1476
[14] Min W, Hou Z A, Ma L J, et al. Effects of water salinity and N application rate on water- and N-use efficiency of cotton under drip irrigation[J]. Journal of Arid Land, 2014, 6(4): 454–467
[15] 黄耀华, 王侃, 杨剑虹. 滴灌施肥条件下土壤水分和速效氮迁移分布规律[J]. 水土保持学报, 2014, 28(5): 87–94
Huang Y H, Wang K, Yang J H. Distribution of soil water and available nitrogen in purple soil under drip fertilization[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 28(5): 87–94
[16] 王虎, 王旭东. 滴灌施肥条件下土壤水分和速效磷的分布规律[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2007, 35(5): 141–146
Wang H, Wang X D. Distribution of soil water and available phosphorus under drip fertigation[J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2007, 35(5): 141–146
[17] 尹飞虎, 刘洪亮, 谢宗铭, 等. 棉花滴灌专用肥氮磷钾元素在土壤中的运移及其利用率[J]. 地理研究, 2010, 29(2): 235–243
Yin F H, Liu H L, Xie Z M, et al. Movement of N, P and K of cotton drip irrigation special fertilizer in soil and the fertilizer use efficiency[J]. Geographical Research, 2010, 29(2): 235–243
[18] 王静, 叶壮, 褚贵新. 水磷一体化对磷素有效性与磷肥利用率的影响[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(11): 1377–1383
Wang J, Ye Z, Chu G X. Coupling effects of water and phosphate fertilizer supply on soil P availability and use efficiency[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(11): 1377–1383
[19] 陈剑, 张泽, Yunger J A, 等. 滴灌精准施肥装置棉田施氮配肥能力研究[J]. 农业机械学报, 2014, 45(12): 62–68
Chen J, Zhang Z, Yunger J A, et al. Distribution and application of urea with precision fertilization device of drip irrigation in cotton fields[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(12): 62–68
[20] Phogat V, Mahadevan M, Skewes M, et al. Modelling soil water and salt dynamics under pulsed and continuous surface drip irrigation of almond and implications of system design[J]. Irrigation Science, 2012, 30(4): 315–333
[21] Zhou Q Y, Kang S Z, Zhang L, et al. Comparison of APRI and Hydrus-2D models to simulate soil water dynamics in a vineyard under alternate partial root zone drip irrigation[J]. Plant and Soil, 2007, 291(1/2): 211–223
[22] 李红. 地下滴灌条件下土壤水分运动试验及数值模拟[D]. 武汉: 武汉大学, 2005: 24–68
Li H. Experiments and numerical simulations of soil-water movement in subsurface drip irrigation[D]. Wuhan: Wuhan University, 2005: 24–68
[23] 池宝亮, 黄学芳, 张冬梅, 等. 点源地下滴灌土壤水分运动数值模拟及验证[J]. 农业工程学报, 2005, 21(3): 56–59
Chi B L, Huang X F, Zhang D M, et al. Numerical simulation and validation of soil water movement under subsurface drip irrigation with point-source emitter[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005, 21(3): 56–59
[24] 张志山, 何明珠, 谭会娟, 等. 沙漠人工植被区生物结皮类土壤的蒸发特性——以沙坡头沙漠研究试验站为例[J]. 土壤学报, 2007, 44(3): 404–410
Zhang Z S, He M Z, Tan H J, et al. Evaporation from soils covered with biological crusts in revegetated desert — A case study in Shapotou Desert Research and Experiment Station[J]. Acta Pedologica Sinica, 2007, 44(3): 404–410
[25] Li X R, Ma F Y, Xiao H L, et al. Long-term effects of revegetation on soil water content of sand dunes in arid region of Northern China[J]. Journal of Arid Environments, 2004, 57(1): 1–16
[26] 汪志荣, 王文焰, 王全九, 等. 点源入渗土壤水分运动规律实验研究[J]. 水利学报, 2000(6): 39–44
Wang Z R, Wang W Y, Wang Q J, et al. Experimental study on soil water movement from a point source[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000(6): 39–44
[27] 朱德兰, 汪志农, 王得祥, 等. 不同土壤中滴灌水分分布与设计参数的确定[J]. 西北农业大学学报, 2000, 28(2): 45–49
Zhu D L, Wang Z N, Wang D X, et al. The principles of water distribution and design parameters of drip irrigation in different soils[J]. Acta Universitatis Agriculturalis Boreali-Occidentalis, 2000, 28(2): 45–49
[28] 张志刚, 李宏, 李疆, 等. 地表滴灌条件下滴头流量对土壤水分入渗—再分布过程的影响[J]. 干旱地区农业研究,

2016, 34(2): 225–231
Zhang Z G, Li H, Li J, et al. Effects of different dripper discharges on soil water infiltration/redistribution under drip irrigation[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2016, 34(2): 225–231

[29] 郑园萍. 滴灌条件下土壤水分入渗过程模拟试验研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2008
Zheng Y P. The simulation research on the soil water infiltration process under the drip irrigation[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2008

[30] 赵文举, 李晓萍, 范严伟, 等. 西北旱区压砂地土壤水分入渗规律研究[J]. 土壤通报, 2016, 47(1): 150–155
Zhao W J, Li X P, Fan Y W, et al. A study on soil water infiltration of gravel-mulched field in northwestern arid area[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2016, 47(1): 150–155

[31] 蔡焕杰, 徐家屯, 王健, 等. 基于 WinSRFR 模拟灌溉农田土壤入渗参数年变化规律[J]. 农业工程学报, 2016, 32(2): 92–98
Cai H J, Xu J T, Wang J, et al. Yearly variation of soil infiltration parameters in irrigated field based on WinSRFR4.1[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(2): 92–98

[32] 董晓华, 刘潇钧, 彭涛, 等. 利用 Hydrus-1D 模拟分层土壤剖面的水流运动[J]. 安徽农业科学, 2016, 44(4): 29–31
Dong X H, Liu X J, Peng T, et al. Hydrus-1D modeling water flow transport in a layered soil profile[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2016, 44(4): 29–31

[33] 马海燕, 王昕, 张展羽, 等. 基于 HYDRUS-3D 的微咸水膜孔沟灌水盐分布数值模拟[J]. 农业机械学报, 2015, 46(2): 137–145
Ma H Y, Wang X, Zhang Z Y, et al. Numerical simulation of water-salt distribution under brackish water film hole furrow irrigation based on HYDRUS-3D model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(2): 137–145